降水变化和氮添加对红砂幼苗根系形态特征的影响

白亚梅， 李 毅， 单立山， 苏 铭， 张婉婷

(甘肃农业大学林学院，甘肃 兰州 730070)

摘 要： 水分和氮素是荒漠生态系统植物生长的主要限制因子，了解降水变化和氮沉降加剧如何影响典型荒漠植物根系形态特征，有助于揭示全球气候变化背景下的典型荒漠植物响应和适应机制，为有效进行荒漠植物恢复建设及管理提供理论依据。采用盆栽试验，研究了红砂(*Reaumuria soongorica*)幼苗根系形态特征对不同氮添加量(0 g·m^{-2}·a^{-1})、4.6 g·m^{-2}·a^{-1}、9.2 g·m^{-2}·a^{-1}和13.8 g·m^{-2}·a^{-1}和降水处理[(70%(W_-)、100%(自然降水W)、130%(W_+)]的响应。结果表明：(1)降水对红砂幼苗总根长、总表面积、总根体积、根系生物量、比根长和比表面积均有极显著影响($P<0.01$)；(2)氮添加对红砂幼苗总根体积有极显著影响($P<0.01$)，对根系生物量影响显著($P<0.05$)；(3)降水变化和氮添加交互作用对红砂根系形态指标无显著影响($P>0.05$)。同一氮水平下，随降水量的增加红砂总根长、总表面积、总根体积、根生物量、比根长、比表面积均呈现增大的趋势，且在降水量130%处理下(W_+)各相关指标达到最大值；在降水量70%(W_-)和降水量不变(W)的条件下，红砂根系各形态指标随着氮添加量的增加呈现出先增大后减小的趋势，而在降水量130%条件下(W_+)，各指标随着氮含量的增加大致呈先减小后增大的趋势，且各个指标均在增水、高氮水平时最大。可见，红砂根系生长主要取决于降水，且红砂根系生长存在明显的水氮耦合效应，在高水、高氮条件下，红砂根系生长促进效应最明显。在我国西北干旱和半干旱区，可以在雨季降水量大时通过施入氮肥(N_3)来促进红砂根系快速生长、下扎；在干旱少雨时，通过施入适量的氮肥(N_1)来促进红砂根系的生长，缓解干旱对红砂根系的限制作用。

关键词： 降水变化；氮添加；红砂幼苗；根系形态

随着人类社会的发展，由农业和工业活动引起的全球气候变化极其剧烈，其中降水变化和氮沉降是近年来人们关注的热点问题[1-3]。IPCC研究结果显示：未来全球降水格局还会持续发生变化，极端降水的发生频率将会明显增加[4]，季节性降水也将发生显著变化，主要表现在夏季单次降水量增大且降水时间延长[5]。我国西北地区属于较干旱地区，降水的季节性波动表现更加明显[6]。预计未来，春、夏季降水将增多，冬季降水逐渐减少，年降水有增加趋势；降水年增幅较大的地区由内蒙古东部逐渐向西北偏移[7-8]。随着降水格局的变化，干旱、半干旱地区的植物水分利用格局、生理特性、形态特征、环境适应性等也会发生相应的改变。自工业革命以来，燃烧化石燃料、使用化学氮肥等人类活动，使得含氮化合物的排放量大幅度增加，从而导致全球氮沉降明显增加[9-11]。过度的氮沉降会引起生态系统结构和功能的变化，也会加剧陆地生态系统的酸化能力，改变土壤养分状况，从而进一步影响植物的生长。在我国西北干旱和半干旱地区，年平均降雨量和土壤氮含量均较低，水分条件和氮浓度成为该地区初级生产力的主要限制因子。因此，开展荒漠生态系统植物响应降水变化和氮沉降的研究，对荒漠植被的恢复建设及管理具有重要意义。

植物的生长主要受到水分条件的限制，而通过施肥等措施来调节植物水分状况是减轻干旱胁迫的有效途径之一[12]。有研究表明，干旱条件下施氮使植物地上生物量明显增加[13]，有效提高植物的光合速率，促进植株生长，缓解因水分不足而对植物产生的不利影响[14-15]。对于植物而言，吸收水分以及养分的主要器官是根系。李文娆等[16]研究发现，水分搭配施氮处理可以使干旱对棉花幼苗生长和根系形态的抑制程度减轻，并有效提高水分利用效

收稿日期： 2019－11－13； **修订日期：** 2020－03－25

基金项目： 国家自然科学基金(31560135)；甘肃省重点研发计划项目(17YF1WA161)；甘肃农业大学青年导师基金(GAU-QNDS-201605)和甘肃农业大学学科建设专项(GSAU-XKJS-2018-104)共同资助

作者简介： 白亚梅(1993-)，女，在读研究生，主要研究方向为荒漠植物生理生态. E-mail: 1909533155@qq.com

通讯作者： 李毅. E-mail: liyi@gsau.edu.cn

率。顾东祥等[17]通过对不同水氮处理的水稻根系形态指标的研究,分析了植株根系生长状况和根系分布特征,发现合理施氮与控水可大大优化水稻根系的生长与分布特征。可见,学者对水氮变化对植物生长的影响进行了大量研究,但大多集中研究植物的地上部分,且主要集中在小麦、棉花和水稻等农作物的研究,而对荒漠生态系统荒漠植物的研究相对较少。因此,开展荒漠生态系统荒漠植物特别是根系对降水变化和氮沉降响应的研究,对揭示未来全球气候变化背景下荒漠植物的响应和适应机制具有重要意义。

红砂(*Reaumuria soongorica*),柽柳科红砂属小灌木或半灌木,叶细小,鳞片状,短圆柱形,广泛分布在中国西北干旱和半干旱区,是该区的建群种和优势种[18],抗逆性强,且具有很强的生态可塑性、抗旱性和耐盐性[19-20]。种培芳等[21]研究发现,红砂在极端干旱条件下通过降低蒸腾、提高水分利用率等途径来提高对环境的适应性。周生荟等[22]通过测定红砂的气体交换和叶绿素荧光参数的日变化来研究红砂干旱胁迫下的光保护机制,红砂在干旱期间,采取了依赖于叶黄素循环的热能耗散和PSⅡ反应中心可逆失活2种光抑制的保护机制来度过干旱维持生存。除此之外,也有对红砂根系形态指标响应降水变化的机制做了相应的研究。然而,前人所做的研究大多集中在红砂的地上部分响应干旱胁迫的机理,而对地下根系部分的研究较少,尤其关于红砂幼苗根系对多因素(水分和氮素)交互的影响还鲜有报道。因此,本研究以一年生荒漠植物红砂为试验材料,模拟不同水分及氮肥梯度,探讨红砂幼苗根系对水分变化和氮添加的响应和适应特征,以期为未来荒漠生态系统中降水变化及氮浓度升高下荒漠植物红砂的生长管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验地位于甘肃农业大学(36.09°N,103.69°E,海拔1558 m),年平均降水量349.9 mm,潜在蒸发量在1400~1800 mm,年平均日照时数2607.6 h,属于温带半干旱气候。盆栽试验土为壤土(速效氮含量为24 mg·kg^{-1},速效磷含量240 mg·kg^{-1},速效钾含量130 mg·kg^{-1};pH为7.9)。

于2018年3—11月在甘肃农业大学校内试验基地进行。2018年3月底,从红砂自然分布区挑选出长势基本一致的红砂幼苗,平均株高10 cm、株幅10 cm。将其移栽到上径为32 cm,下径为26 cm,高35 cm的花盆中,每盆种植1株,试验共设12个处理(降水3个梯度、氮4个梯度),设置3次重复,共计栽植了108盆。定植后为保证幼苗成活每天进行了水分管理和遮阴,待缓苗2个月后,于6月初开始控水和施氮处理。

1.2 试验设计

添加氮素量参照西北荒漠区大气氮沉降水平[23]设置4个水平,分别为:对照CK(N_0:氮素0 g·m^{-2}·a^{-1})、低氮水平(N_1:4.6 g·m^{-2}·a^{-1})、中氮水平(N_2:9.2 g·m^{-2}·a^{-1})、高氮水平(N_3:13.8 g·m^{-2}·a^{-1}),模拟施氮材料选择尿素[$(NH_2)_2CO$][24],根据尿素中氮的含量为46.7%,将N_1、N_2、N_3分别换算成1年施入花盆尿素的量,分别为0.8865 g、1.7730 g、2.6595 g,并分5次于6—10月红砂生长期间均匀喷洒于土壤中。

根据红砂自然分布区(民勤)生长季(6—10月)每月平均降雨量(中国气象局1951—2011年的降雨资料为依据),设置降水梯度。根据民勤荒漠区气象资料显示(1951—2011年的降雨资料为依据),该区多年平均降雨量为109.5 mm,降雨量较高年份多为142.4 mm左右,比多年平均水平高出约30%;降雨量较低年份多为76.7 mm左右,比多年平均水平低约30%。同时,本研究降水模拟控制主要考虑生长季降水量对其生长的影响,根据气象资料统计多年平均自然降雨量113.2 mm,本实验模拟年降水量为110.0 mm,在此基础上增加和减少了30%,分别为W_+(130%)和W_-(70%)处理降水量。在模拟降水量的试验中,计算出6—10月的月降水量占比,分别换算出每个月的降水量[25-27]。然后,根据花盆直径大小将各处理的降水量换算为灌水量,灌水量计算方法:在直径为20 cm的雨量器内,每降水31.4 mm相当于自然降水1 mm,即:$3.14\times(10\ cm)^2 / 31.4\ cm^3 = S/A$,式中:$A$代表降水量;$S$代表降水面积,即在面积为$S$的地面上降水$A$ mL相当于1 mm降水[28-29]。试验期间,每月分6次(每5 d 1次)灌水,模拟灌水时间设在19:00,并随时关注天气变化,遇到雨天及时搭建遮雨棚,拦截降雨,天晴则撤掉雨棚避免影响植物的光合作用。

1.3 测定指标与方法

试验共取样3次,考虑到水分变化和氮添加对

根系生长的累计效应，本次数据采用2018年11月取样数据，取样时，先用卷尺测量株高和冠幅，再从基径处剪断使地上植株与根系分离，并用游标卡尺测量基径，将地上植株装入信封。用手使劲拍打花盆外侧，使土体与花盆分离，摘出土壤中的全部根系，并将根系装入自封袋，带回实验室进行室内实验。形态指标测定前用毛刷除去粘附在根系表面的沙土，用去离子水清洗根系，处理根系土壤后，装到信封里，在低温冰箱保存以备根系扫描。采用Espon scanner数字化扫描仪对根系进行扫描，扫描后运用细根分析软件（Win-RhIZO 2008a，Régent Instruments Inc.，Québec，Canada）计算总根长、总表面积、根系体积等根系形态指标。然后将各处理下的根系分别装入信封内，放入80 ℃烘箱内烘干至恒重，并称得根系生物量。根据所测得根长、根表面积和根系生物量计算比根长和比表面积，具体如下公式：

$$比根长(cm\cdot g^{-1})=\frac{根长(cm)}{生物量(g)}$$

$$比表面积(cm^2\cdot g^{-1})=\frac{表面积(cm^2)}{生物量(g)}$$

1.4 数据处理与分析

采用Microsoft Excel 2007进行数据处理分析及绘制图表，图中数据均为平均值±标准误差。采用IBM SPSS Statistics 20.0软件进行方差分析。其中，同一降水或氮水平下，氮添加或降水变化对根系形态指标的影响采用单因素分析法；降水变化和氮添加的交互作用对根系形态指标的影响采用双因素方差分析。

2 结果与分析

2.1 不同降水和氮水平下总根长、总根表面积比较

由表1可知，降水对红砂幼苗总根长和总根表面积均有极显著影响（$P<0.01$），而氮添加及水氮的交互作用对红砂幼苗总根长、总根表面积的影响均不显著（$P>0.05$）。由图1可知，同一氮水平下，随降水量的增加总根长和总表面积呈现出增加的趋势，除N_1水平外，其他各氮水平下降水增加30%其总根长和总根表面积显著高于对照（W）和降水减少30%处理（$P<0.05$）。与对照相比，降水量增加30%（W_+）在各氮水平下总根长分别增加了120.95%、18.08%、54.91%、244.85%，总根表面积分别增加了115.13%、17.12%、55.92%、220.65%；降水量减少30%（W_-），各氮水平下总根长分别减少了64.41%、59.57%、59.21%、55.67%，总表面积分别减少了63.81%、64.71%、60.90%、49.10%。在降水量减少30%（W_-）和降水量不变（W）处理下，随氮素含量增加，红砂幼苗总根长和总根表面积均呈现出先增大后减小的趋势，且都在低氮水平（N_1）时，总根长和总表面积达到最大值，较无氮添加时（N_0），总根长分别增加了41.46%和24.53%；总根表面积分别增加了36.79%和40.30%；而在降水量增加30%（W_+）处理下，随着施氮量的增加，红砂幼苗总根长和总表面积均呈现先减小后增大的趋势。

2.2 不同降水和氮水平下总根体积、根系生物量的比较

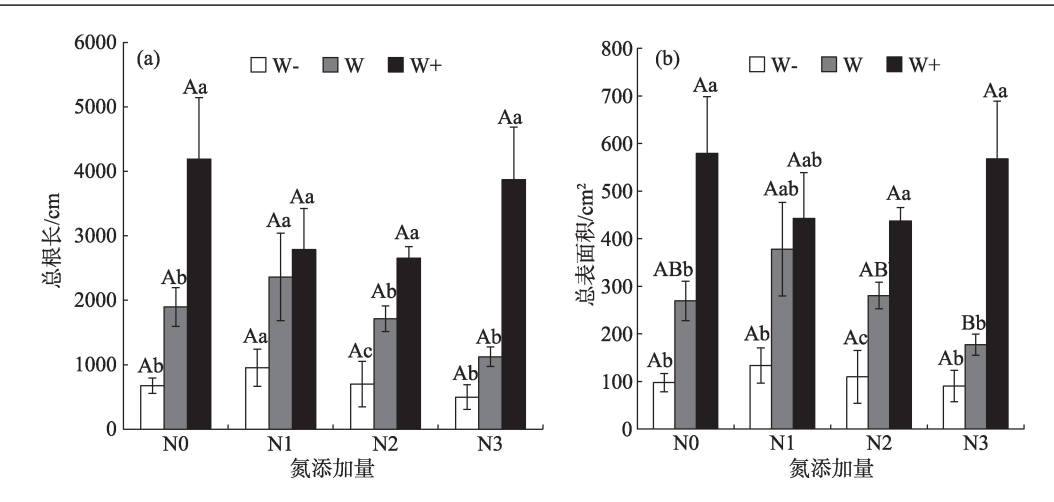
由表1可知，降水对红砂幼苗总根体积、根系生物量均有极显著影响（$P<0.01$），氮添加对红砂幼苗总根体积有极显著影响（$P<0.01$），对根系生物量影响显著（$P<0.05$），但二者的交互作用对总根体积和根系生物量均无显著影响（$P>0.05$）。由图2可知，同一氮水平下，随着降水量的增加红砂幼苗总根体积、根系生物量呈增加的变化趋势，在降水量增加30%时其根体积和根系生物量达到最大值，且各氮水平下降水量增加30%处理其根体积和根系生物量显著大于降水量减少30%处理。与对照相比，各

表1 降水变化和氮添加对红砂幼苗根系形态指标影响的双因素方差分析结果（*F*值）

Tab. 1 Two-way ANOVA(*F*-values) of effects of precipitation and nitrogen addition on root morphology indexes of *R. soongorica* seedling

变量	总根长	总表面积	总根体积	根系生物量	比根长	比表面积
W	30.090***	33.524***	9.922***	7.651**	9.970***	32.624***
N	0.762	0.327	4.405**	3.736*	1.774	0.298
W×N	1.475	0.201	0.921	1.037	0.640	1.221

注：*表示在$P<0.05$水平上显著；**表示在$P<0.01$水平上显著；***表示在$P<0.001$水平上显著。W表示降水变化效应；N表示氮添加量；W×N表示降水变化与氮添加量的交互效应。



注:不同大写字母表示同一水分处理下,不同氮添加量下观测指标间的显著性;不同小写字母表示同一氮水平下,不同水分条件下观测指标间的显著性。W表示自然降雨量;W_-表示降雨量减少30%;W_+表示降雨量增加30%;N_0为CK;N_1为氮添加量为4.6 $g·m^{-2}·a^{-1}$;N_2为氮添加量为9.2 $g·m^{-2}·a^{-1}$;N_3为氮添加量为13.8 $g·m^{-2}·a^{-1}$。下同。

图1 不同降水和氮添加量下红砂幼苗总根长、总表面积的变化

Fig. 1 Dynamics of total root length, total root surface area of *R. soongorica* seedling in different precipitation and nitrogen addition

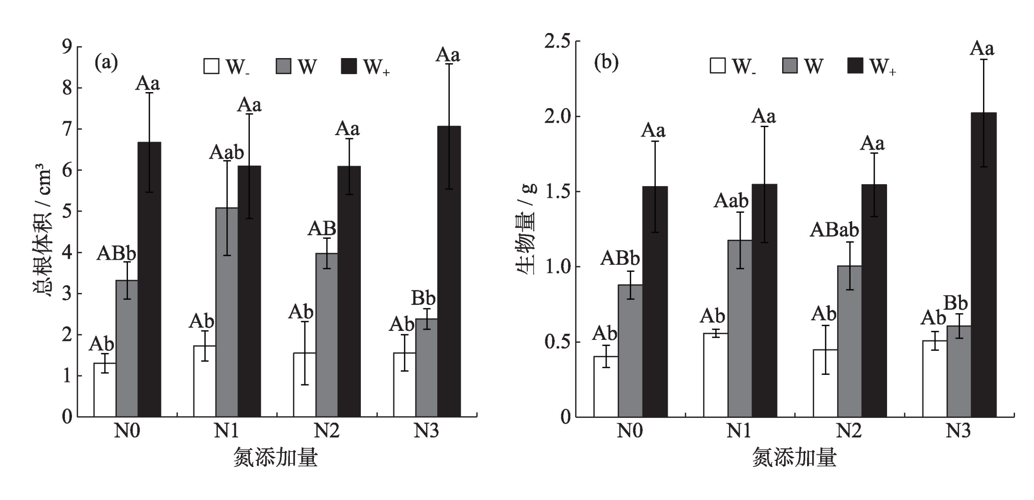


图2 不同降水和氮添加量下红砂幼苗总根体积、根系生物量的变化

Fig. 2 Dynamics of total root volume, root biomass of *R. soongorica* seedling in different precipitation and nitrogen addition

氮水平下降水量增加30%(W_+)其总根体积分别增加了101.15%、20.00%、53.22%、196.67%,根系生物量分别增加了74.41%、31.63%、53.58%、233.94%;而各氮水平下降水量减少30%(W_-)其总根体积分别减少了60.69%、66.03%、61.00%、34.61%,根系生物量分别减少了54.04%、52.57%、55.45%、16.11%。在降水量增加30%(W_+)情况下,随着氮添加量的增加,总根体积和根系生物量总体表现为增大的趋势,在降水增加30%高氮水平下,总根体积和根系生物量达到最大值,分别为7.06 cm^3和2.02 g;而在降水量减少30%(W_-)和对照(W)处理条件下,随着氮含量的增加,红砂幼苗总根体积和根系生物量均为先增大后减小,且都在低氮水平(N_1)时达到最大值,此时的总根体积相对于对照(N_0)分别增加了32.27%和53.05%,根系生物量分别增加了38.00%和33.73%。

2.3 不同降水和氮水平下比根长、比表面积比较

如表1所示,降水对红砂幼苗比根长和比表面积的影响极显著($P<0.01$),氮添加及其两者之间的交互作用对红砂幼苗比根长、比表面积均无显著影响($P>0.05$)。由图3可知,同一氮水平下,比根长和比表面积大体上呈现随着水分的增加而增大,降水量减少30%处理其比根长和比表面积都较小,且在N_0水平下,对照和降水量增加30%处理差异显著($P<0.05$)。降水量减少30%(W_-)时,随着氮添加量的增大红砂幼苗比根长和比表面积逐渐减小,其中

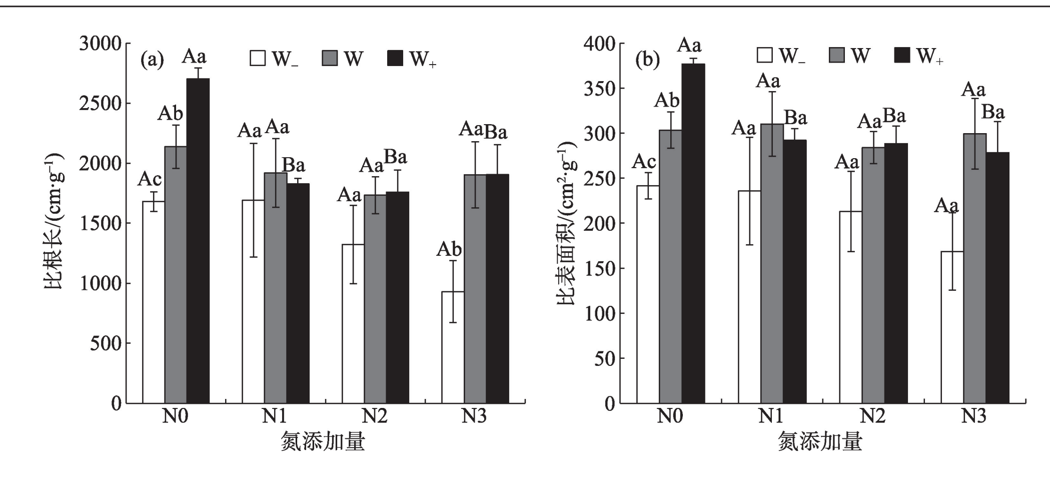


图3 不同降水和氮添加量下红砂幼苗比根长、比表面积的变化

Fig. 3 Dynamics of specific root length, specific root area of *R. soongorica* seedling in different precipitation and nitrogen addition

比根长较对照(N_0)分别减少了0.70%、21.26%、45.05%,比表面积分别减少了2.38%、11.79%和30.20%。

3 讨论

3.1 降水变化和氮添加对幼苗总根长、总根表面积、总根体积、根系生物量的影响

植物主要通过根系来获取土壤中的水分和养分,因此根系是植物生长的重要器官,它能够对水分胁迫迅速做出反应[30]。在水分胁迫时,一方面根系将自身产生的化学信号迅速传至植物地上部分,地上部分随即关闭气孔,保存体内水分减少耗散;另一方面植物根系为适应不同的土壤水分条件,而调整自身的生理特性和形态特征[31-32]。有研究指出,植物根系总根长、根表面积、总根体积、根生物量等形态特征指标可以被用来评价植物在水分胁迫条件下的抗旱性[33]。植物在遇到干旱胁迫时,会通过增加根系表面积、根长、体积等指标来提高自身的抗旱性能,以便度过干旱期[34-37]。然而也有研究指出,干旱胁迫会抑制紫花苜蓿主根的伸长生长,使主根直径变小,但侧根和总根长均呈增大趋势[38]。本研究发现,在同一氮水平下,随着降水量增加,红砂幼苗总根长、根表面积、总根体积、根生物量也随之增加,且降水减少30%处理与降水增加30%差异显著,表明降水量增加促进了红砂幼苗根系的生长,这与水分胁迫条件下,小麦根系生长受阻,而随着土壤供水条件的改善,可极显著地促进根系生长[39]的研究结果一致,说明在干旱环境下,养分的转化和迁移均受到了限制,而增加降水量,使得土壤中养分限制得以缓解,从而提高养分的可利用性,促进植物对养分的吸收利用[40]。

氮是限制植物生长的主要因子之一[41]。大气氮沉降的增加,使得土壤中可利用的氮以及植物体内氮的积累也随之增加,继而对植物的生长发育也产生显著影响。Galloway等[42]的研究表明,适度比例地增加氮含量能够促进植物的生长,但如果超过了植物可利用氮水平的临界值,就可能对植物的根系生长产生负作用。Schulze[43]指出,森林中过量供氮导致树木活性下降,氮含量过量会影响植物体内的养分平衡,或者造成土壤酸化,近而影响整个植株的生长。辛月等[44]的试验表明,青杨植株的根冠比随着氮浓度的升高逐渐减小,这一结果说明氮沉降促进了植物地上部分的生长,而抑制了地下部分的生长。在降雨量减少30%(W_-)和对照(W)条件下,随着氮含量的增加,红砂幼苗总根长、根表面积、总根体积、根生物量呈现先增大后减小的趋势,这与当灌水量一定时,2种红小豆(*Phaseolus angularis* Wight)的总根长、根表面积等随施氮量的增加呈先升后降的单峰曲线变化[45]的结果一致。而在降雨量增加30%(W_+)时,各根系形态指标随着氮含量的增加呈现先减小后增大的趋势,且根系生物量和根体积在增加降水量30%高氮处理下达到最大值,表明氮素效应取决于水分效应,在降水量增加条件下氮素效应更明显,也说明水肥耦合对促进红砂幼苗根系生长有明显影响,这与梁银丽等[39]土壤水分状况良好的情况下增加氮肥施用量,对小麦根系生物量的提高比较有利的结果一致。因此,水分条件相对较好的情况下,可以相应地提高施氮量,以此

来提高水分利用率[46];而在降水量较少的情况下(W和W_-),红砂对氮素的吸收具有一定的阈值,在低氮水平下(N_1)其利用效率最好,根系生长状况也相对较好,也说明在较低的水分条件下适量添加氮素可以使植物根系的生长状况更好,这与徐国伟等[47]水分胁迫条件下,氮素起一定的"以肥调水"作用,从而减轻土壤水分胁迫影响的结果一致。

3.2 降水变化和氮添加对红砂幼苗根系比根长、比表面积的影响

根长、根表面积只是衡量根系发育情况的一种指标,而比根长(*SRL*)和比表面积(*SRA*)直接反映植物根系吸收水分和养分的能力,因此,*SRL*和*SRA*被作为指示根系形态功能的重要指标之一,来综合反映植物吸收资源的能力和适应生态的能力,其值越大,说明投入相同的成本,养分利用效率越高[48]。有研究表明,当土壤水分和氮含量较低时,植物根系组织密度增大,从而导致比根长(*SRL*)减小[49-50]。而Metcalfe等[51]的研究表明,随着林地土壤水分的减小,比根长(*SRL*)呈现增加的趋势。可见,不同植物的*SRL*和*SRA*对不同的环境条件产生的响应差异较大。本研究发现,同一氮水平下,比根长和比表面积大体上随着降水量的增加呈现出增大的趋势,且在N_0水平下降水量减少30%时,其值显著低于对照和降水量增加30%处理,这与Poorter[49]和Wahl等[50]的研究,土壤水分和氮肥缺乏时*SRL*和*SRA*减小的结果一致,表明干旱和低氮环境使得植物根系木质部导管直径减小,从而影响植物利用养分的效率。在降雨量减少30%(W_-)时,*SRL*和*SRA*随着氮添加量的增加而减小,这一现象与种培芳等[52]的研究结果一致,说明降水变化和氮梯度对红砂根系的影响是一个综合的过程,降水变化和氮含量对*SRL*和*SRA*的影响也极为复杂。因此,今后的实验过程中需要作进一步研究降水变化和氮含量具体如何影响*SRL*和*SRA*值。

4 结 论

降水变化和氮含量均对红砂根系形态特征有不同程度的影响,同一氮水平下,随降水量增加各根系形态指标显著增加,表明水分增加促进了红砂幼苗根系的生长。而氮素添加对植物的生长效应取决于水分,在降水增加情况下,氮肥施用量增大显著促进了红砂幼苗根系的生长,表明降水量增加能提高红砂根系对氮素的利用效率,从而有效提高水分利用效率,促进植物根系生长;而在干旱胁迫条件下,适量地施入氮肥才可以起到"以肥调水"作用。降水变化和氮添加对红砂幼苗根系生长具有明显的水肥耦合效应,在高水高氮情况下有利于荒漠植物红砂幼苗根系生长。在我国西北干旱和半干旱区,面对未来气候变化特征,可以在干旱少雨期施入适量的氮肥(N_1)来促进红砂根系的生长,缓解干旱对红砂根系的限制作用;而在雨季降水量较大时通过施入氮肥(N_3)来促进根系快速生长、下扎。

参考文献(References):

[1] 常运华, 刘学军, 李凯辉, 等. 大气氮沉降研究进展[J]. 干旱区研究, 2012, 29(6): 972-979. [Chang Yunhua, Liu Xuejun, Li Kaihui, et al. Research rrogress in atmospheric nitrogen deposition[J]. Arid Zone Research, 2012, 29(6): 972-979.]

[2] Galloway J N, Cowling E B, Seitzinger S P, et al. Reactive nitrogen: Too much of a goodthing? [J]. Ambio, 2002, 31(2): 60-63.

[3] 周晓兵, 张元明. 干旱半干旱区氮沉降生态效应研究进展[J]. 生态学报, 2009, 29(7): 3835-3845. [Zhou Xiaobing, Zhang Yuanming. Review on the ecological effects of N deposition in arid and semi-arid areas[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(7): 3835-3845.]

[4] Allen S K, Plattner G K, Nauels A, et al. Climate change 2013: The physical science basis[C]//An overview of the Working Group 1 contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Computational Geometry, 2007, 18(2): 95-123.

[5] 孙百生, 钱金平, 赵欢蕊. 西北典型荒漠植物红砂生物量及根系形态特征对降水格局的响应[J]. 生态环境学报, 2018, 27(11): 17-23. [Sun Baisheng, Qian Jinping, Zhao Huanrui. Response of biomass and root morphology of desert plants *Corispermum candelabrum* to precipitation change in Northwest China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, 27(11): 17-23.]

[6] 周雅聃, 陈世苹, 宋维民, 等. 不同降水条件下两种荒漠植物的水分利用策略[J]. 植物生态学报, 2011, 35(8): 789-800. [Zhou Yadan, Chen Shiping, Song Weimin, et al. Wateruse strategies of two desert plants along a precipitation gradient in Northwestern China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2011, 35(8): 789-800.]

[7] 任国玉, 袁玉江, 柳艳菊, 等. 我国西北干燥区降水变化规律[J]. 干旱区研究, 2016, 33(1): 1-19. [Ren Guoyu, Yuan Yujiang, Liu Yanju, et al. Changes of precipitation over Northwest China[J]. Arid Zone Research, 2016, 33(1): 1-19.]

[8] 姚俊强, 杨青, 毛炜峄, 等. 西北干旱区大气水分循环要素变化研究进展[J]. 干旱区研究, 2018, 35(2): 269-276. [Yao Junqiang, Yang Qing, Mao Weiyi, et al. Characteristics of water cycle in atmosphere in the arid region of Northwestern China[J]. Arid Zone

Research, 2018, 35(2): 269-276.]

[9] Galloway J N, Townsend A R, Erisman J W, et al. Transformation of the nitrogen cycle: Recent trends, questions, and potential solutions[J]. Science, 2008, 320(5878) : 889 -892.

[10] 苏原, 罗艳, 耿凤展, 等. 天山高寒草原植物叶片氮磷化学计量特征对氮沉降的响应 [J]. 干旱区研究, 2019, 36(2): 430-436. [Su Yuan, Luo Yan, Geng Fengzhan, et al. Response of stoichiometric characteristics of nitrogen and phosphorus in plant leaves in an alpine grasslands to nitrogen deposition in the Tianshan Mountains[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(2): 430-436.]

[11] 张毓涛, 李吉玫, 李翔, 等. 模拟氮沉降对天山云杉凋落叶分解及其养分释放的影响[J]. 干旱区研究, 2016, 33(5): 966-973. [Zhang Yutao, Li Jimei, Li Xiang, et al. Effects of simulated nitrogen deposition on the decomposition and nutrient release of leaf litters of *Picea schrenkiana*[J]. Arid Zone Research, 2016, 33(5): 966-973.]

[12] 丁红, 张智猛, 戴良香, 等. 水分胁迫和氮肥对花生根系形态发育及叶片生理活性的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(2): 450-456. [Ding Hong, Zhang Zhimeng, Dai Liangxiang, et al. Effects of water stress and nitrogen fertilization on peanut root morphological development and leaf physiological activities[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(2): 450-456.]

[13] Ren Shujie, Zhang Leiming, Zhang Suiqi, et al. The effect of nitrogen nutrition on coordinate growth of root and shoot of winter wheat [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2003, 23(3): 395-400.

[14] Zhang Lixin, Li Shengxiu. Effects of nitrogen, potassium and glycinebetaine on the lipid peroxidation and protective enzyme activities in water-stressed summer maize[J]. Acta Agronomica Sinica, 2007, 33(3): 482-490.

[15] Pinheiro H A, Da Matta F M, Chaves A R M, et al. Drought tolerance in relation to protection against oxida-tive stress in clones of *Coffea canephora* subjected tolong term drought[J]. Plant Science, 2004, 167: 1307-1314.

[16] 李文娆, 范雨龙, 冯士珍, 等. 水氮耦合对棉花幼苗根冠生长和水分利用效率的影响[J]. 河南农业科学, 2017, 46(9): 18-24. [Li Wenrao, Fan Yulong, Feng Shizhen, et al. Effect of coupling of water and nitrogen on shoot and root growth and water use efficiency of cotton seedlings[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2017, 46(9): 18-24.]

[17] 顾东祥, 汤亮, 徐其军, 等. 水氮处理下不同品种水稻根系生长分布特征[J]. 植物生态学报, 2011, 35(5): 558-566. [Gu Dongxiang, Tang Liang, Xu Qijun, et al. Root growth and distribution in rice cultivars as affected by nitrogen and water supply[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2011, 35(5): 558-566.]

[18] Liu Y, Zhang T, Li X, et al. Protective mechanism of desiccation tolerance in *Reaumuria soongorica*: Leaf abscission and sucrose accumulation in the stem[J]. Science in China(Series C: Life Sciences), 2007, 1: 17-23.

[19] 马茂华, 孔令韶. 新疆呼图壁绿洲边缘的琵琶柴生物生态学特性研究[J]. 植物生态学报, 1998, 22(3): 237-244. [Ma Maohua, Kong Lingshao. The bioecological characteristics of *Reaumuria soongorica* on the border of oasis at Hutubi, Xinjiang[J]. Acta Phytoecologica Sinica, 1998, 22(3): 237-244.]

[20] 黄培祐, 聂湘萍, 周建民, 等. 准噶尔盆地中部琵琶柴(*Reaumuria soongorica*)群落的生境研究[J]. 新疆大学学报(自然科学版), 1988(3): 68-73. [Huang Peiyou, Nie Xiangping, Zhou Jianmin, et al. Study on the habitat of (*Raeumuria soongorica*) community in Zhunggerbasin[J]. Journal of Xinjiang University, 1988(3): 68-73.]

[21] 种培芳, 李毅, 苏世平, 等. 红砂3个地理种群的光合特性及其影响因素[J]. 生态学报, 2010, 30(4): 914-922. [Chong Peifang, Li Yi, Su Shiping, et al. Photosynthetic characteristics and their effect factors of *Reaumuria soongorica* on three geographical populations[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(4): 914-922.]

[22] 周生荟, 刘玉冰, 谭会娟, 等. 荒漠植物红砂在持续干旱胁迫下的光保护机制研究[J]. 中国沙漠, 2010, 30(1): 69-73. [Zhang Shenghui, Liu Yubing, Tan Huijuan, et al. The photoprotective mechanism of desert plant *Reaumuria soogorica* under progressive soil drying[J]. Journal of Desert Research, 2010, 30(1): 69-73.]

[23] Liu X, Zhang Y, Han W, et al. Enhanced nitrogen deposition over China[J]. Nature, 2013, 494(7438): 459-462.

[24] 文海燕. 氮沉降对黄土高原典型草原碳过程的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2013. [Wen Haiyan. Effects of Nitrogen Deposition on Carborn Dynamics in the Typical Steppe of the Loess Plateau[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2013.]

[25] 肖春旺. 施水量对毛乌素沙地4种优势植物叶绿素荧光的影响[J]. 草地学报, 2001, 9(4): 296-301. [Xiao Chunwang. Effect of water supply change on chlorophyll fluorescence of four dominant plants in Maowusu sand land[J]. ActaPratacultural Science, 2001, 9(4): 296-301.]

[26] 付晓玥, 闫建成, 梁存柱, 等. 干旱与半干旱区一年生植物水势对模拟降水变化的响应[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版), 2012, 43(2): 160-167. [Fu Xiaoyue, Yan Jiancheng, Liang Cunzhu, et al. Water potentials of annual plants response to simulated rainfall in arid and semiarid regions[J]. Journal of Inner Mongolia University(Natural Science Edition), 2012, 43(2): 160-167.]

[27] 闫建成, 梁存柱, 付晓玥, 等. 草原与荒漠一年生植物性状对降水变化的响应[J]. 草业学报, 2013, 22(1): 68-76. [Yan Jiancheng, Liang Cunzhu, Fu Xiaoyue, et al. The responses of annual plant traits to rainfall variation in steppe and desert regions[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2013, 22(1): 68-76.]

[28] 寇祥明, 杨利民, 姜雷, 等. 五叶地锦幼苗生长和生理生态特性对模拟降水量变化的响应[J]. 吉林农业大学学报, 2006, 28(5): 521-524. [Kong Xiangming, Yang Limin, Jiang Lei. Effect of simulated precipitation change on growth and physiological ecology of *Parthenocissus quiquefolia* seedlings[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2006, 28(5): 521-524.]

[29] 李秋艳, 赵文智. 5种荒漠植物幼苗对模拟降水量变化的响应[J]. 冰川冻土, 2006, 28(3): 414–420. [Li Qiuyan, Zhao Wenzhi. Responses of seedlings of five desert species to simulated precipitation change[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(3): 414–420.]

[30] 段桂芳, 单立山, 李毅, 等. 红砂幼苗根系形态特征对降水格局变化的响应[J]. 草业学报, 2016, 25(10): 95–103. [Duan Guifang, Shan Lishan, Li Yi, et al. Response of root morphology to precipitation change in *Reaumuria soongorica* seedlings[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2016, 25(10): 95–103.]

[31] Jia W, Zhang J. Stomatal movement and long-distance signaling in plants[J]. Plant Signaling & Behavior, 2008, 3(10): 772–777.

[32] 丁红, 张智猛, 戴良香, 等. 不同抗旱性花生品种的根系形态发育及其对干旱胁迫的响应[J]. 生态学报, 2013, 33(17): 5169–5176. [Ding Hong, Zhang Zhimeng, Dai Liangxiang, et al. Responsesof root morphology of peanut varieties differing in drought tolerance to water-deficient stress[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(17): 5169–5176.]

[33] 马廷臣, 余蓉蓉, 陈荣军, 等. PEG-6000模拟干旱对水稻幼苗期根系的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(6): 1206–1211. [Ma Tingchen, Yu Rongrong, Chen Rongjun, et al. Effect of drought stress simulated with PEG-6000 on root system in rice seedling[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(6): 1206–1211.]

[34] Zhang Xiying. Characters and dynamic model of sorghum root growth and development[J]. Chinese Journal of Ecology, 1999, 18(5): 65–67.

[35] Hund A, Ruta N, Liedgens M. Rooting depth and water use efficiency of tropical maize inbred lines, differing in drought tolerance[J]. Plant and Soil, 2009, 318(1–2): 311–325.

[36] Jongrungklang N, Toomsan B, Vorasoot N, et al. Rooting traits of peanut genotypes with different yield responses to pre-flowering drought stress[J]. Field Crops Research, 2011, 120(2): 0–270.

[37] Wang H, Siopongco J, Wade L J, et al. Fractal analysis on root systems of rice plants in response to drought stress[J]. Environmental and Experimental Botany, 2009, 65(2–3): 338–344.

[38] 李文娆, 张岁岐, 丁圣彦, 等. 干旱胁迫下紫花苜蓿根系形态变化及与水分利用的关系[J]. 生态学报, 2010, 30(19): 5140–5150. [Li Wenrao, Zhang Suiqi, Ding shengyan, et al. Root morphological variation and water use in Alfalfa under drought stress[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(19): 5140–5150.]

[39] 梁银丽, 陈培元. 土壤水分和氮磷营养对小麦根系生理特性的调节作用[J]. 植物生态学报, 1996, 20(3): 255–262. [Liang Yinli, Chen Peiyuan. Adjustment of physiological characters of root systems of wheat by soil moisture, nitrogen and phosphorus[J]. Acta Phytoecologica Sinica, 1996, 20(3): 255–262.]

[40] 刁励玮, 李平, 刘卫星, 等. 草地生态系统生物量在不同气候及多时间尺度上对氮添加和增雨处理的响应[J]. 植物生态学报, 2018, 42(8): 30–42. [Diao Liwei, Li Ping, Liu Weixing, et al. Response of plant biomass to nitrogen addition and precipitation increasing under different climate conditions and time scales in grassland[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2018, 42(8): 30–42.]

[41] Berger T W, Glatzel G. Response of Quercuspetraea seedlings to nitrogen fertilization[J]. Forest Ecology & Management, 2001, 149(1): 1–14.

[42] Galloway J N, Aber J D, Erisman J W, et al. The nitrogen cascade[J]. BioScience, 2003, 53(4): 341–356.

[43] Schulze E D. Air pollution and forest decline in a spruce (*Picea abies*) Forest[J]. Science, 1989, 244(4906): 776–783.

[44] 辛月, 尚博, 陈兴玲, 等. 氮沉降对臭氧胁迫下青杨光合特性和生物量的影响[J]. 环境科学, 2016, 37(9): 3642–3649. [Xin Yue, Shang Bo, Chen Xingling, et al. Effects of elevated ozone and nitrogen deposition on photosynthetic characteristics and biomass of *Populus cathayana*[J]. Environmental Science, 2016, 37(9): 3642–3649.]

[45] 李鑫. 水氮耦合对不同耐旱性红小豆根系生理生态指标的影响[D]. 临汾: 山西师范大学, 2016. [Li Xin. Effects of Coupling Water and Nitrogen on Root Physio-Ecological Indices and Yield of Adzuki Bean[D]. Linfen: Shanxi Normal University, 2016.]

[46] Havlin J L, Kissel D E, Maddux L D, et al. Crop rotation and tillage effects on soil organic carbon and nitrogen[J] . Soil Science Society of America Journal, 1990, 54: 448–452 .

[47] 徐国伟, 吕强, 陆大克, 等. 干湿交替灌溉耦合施氮对水稻根系性状及籽粒库活性的影响[J]. 作物学报, 2016, 42(10): 1495–1505. [Xu Guowei, Lyu Qiang, Lu Dake, et al . Effect of wetting and drying alternative irrigation coupling with nitrogen application on root characteristic and grain-sink activity[J]. Acta Agronomica Sinica, 2016, 42(10): 1495–1505.]

[48] Bauhus J, Khanna P K, Menden N. Aboveground and belowground interactions in mixed plantations of *Eucalyptus globulus*, and *Acacia mearnsii*[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2000, 30(12): 1886–1894.

[49] Poorter M L. Seedling root morphology and biomass allocation of 62 tropical tree species in relation to drought-and shade-tolerance[J]. Journal of Ecology, 2009, 97(2): 311–325.

[50] Wahl S, Ryser P. Root tissue structure is linked to ecological strategies of grasses[J]. New Phytologist, 2000, 148(3): 459–471.

[51] Metcalfe, Daniel B. The effects of water availability on root growth and morphology in an Amazon rainforest[J]. Plant & Soil, 2008, 311: 189–199.

[52] 种培芳, 姬江丽, 李毅, 等. 红砂根系形态和功能特征对CO_2浓度升高和降水量变化的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(5): 1335–1444. [Chong Peifang, Ji Jiangli, Li Yi, et al. Responses of root morphology and functional characteristics of *Reaumuria soongorica* on CO_2 elevation and precipitation variation[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, 23(5): 1335–1444.]

Effects of precipitation change and nitrogen addition on root morphological characteristics of *Reaumuria soongorica*

BAI Ya-mei, LI Yi, SHAN Li-shan, SU Ming, ZHANG Wan-ting

(*College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou* 730070, *Gansu, China*)

Abstract: Water and nitrogen are the main limiting factors for plant growth in desert ecosystems. How precipitation change and nitrogen deposition aggravate affect the root morphological characteristics of typical desert plants helps reveal the response and adaptation mechanism of typical desert plants under the background of global change and provide a theoretical basis for effective restoration and management of desert plants. In this study, a pot experiment was conducted to study the root morphological characteristics of *Reaumuria soongorica* seedlings with different nitrogen additions (0, 4. 6, 9. 2, and 13. 8 $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$) and precipitation[70%($W_-$), 100% (natural precipitation W), and 130% (W_+)] response. The results showed that varying precipitation had significant effects on total root length, total surface area, total root volume, root biomass, specific root length, and specific surface area of *R. soongorica* seedlings (P<0. 01). Nitrogen addition significantly affectedthe total root volume of *R. soongorica* seedlings and root biomass (P<0. 05). The interaction between precipitation change and nitrogen addition had no significant effect on the root morphological index of the *R. soongorica* (P>0. 05). Under the same nitrogen level, the total root length, total surface area, total root volume, root biomass, specific root length, and specific surface area of the *R. soongorica* increased with the increase of precipitation. Under 130% precipitation (W_+), the relevant indicators reached the maximum value; under 70% precipitation (W_-) and constant precipitation (W), the morphological indexes of roots of *R. soongorica* increased first and then decreased with the increase of nitrogen addition. Under 130% precipitation (W_+), each index decreases first and then increases with the increase of nitrogen content, and each index is the largest at the level of increasing water and high nitrogen. It was concluded that the root growth of *R. soongorica* was mainly determined by precipitation. Furthermore, it had an apparent water-nitrogen coupling effect. Under high water and high nitrogen conditions, the growth of *R. soongorica* root was mostly promoted. In the arid and semiarid areas of northwest China, nitrogen fertilizer (N_3) can be applied to promote the rapid growth and rooting of *R. soongorica* in the rainy season when there is heavy rainfall. In the case of drought and lack of rain, proper nitrogen fertilizer (N_1) was applied to promote the growth of *R. soongorica* roots and alleviate the limiting effect of drought on *R. soongorica* roots.

Keywords: precipitation change; nitrogen addition; *Reaumuria soongorica* seedling; root morphology